中国科学: 技术科学 2011 年 第 41 卷 第 6 期: 833 ~ 844
www.scichina.com tech.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

水库泥沙分选及淤积控制研究

周建军*, 张曼, 曹慧群

清华大学水利系、水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084
* E-mail: zhoujj@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2010-05-24; 接受日期: 2011-01-21
水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主研究课题(批准号: 2008-ZY-4)和清华大学自主科研计划(批准号: 20101081780)资助项目

摘要 泥沙淤积是迄今制约水库长期利用和没有解决的重大问题之一. 本文根据水库实测淤积资料、理论分析和数学模型计算等多方面证明了粒径 d>0.1 mm 粗沙会在水库回水末端特定位置或大江大河径流水库集中分选沉积. 同时, 从理论上证明了占入库比例很少的粗沙对大型河道型水库淤积三角洲坡面、最终冲淤平衡坡降和淤积程度有很大影响. 在此基础上, 作者提出在水库特定按固定河段持续挖粗沙以降低平衡淤积坡降、控制淤积和增加长期利用库容. 三峡水库模型计算实例表明, 年挖砂 5000 万 t/a(三峡设计泥沙系列)或 3000 万 t/a(蓄水前 10 年系列)可降低水库百年淤积量 20%, 回水末端淤积大幅度减少, 水库平衡坡降减小 25%~30%; 水库 50~100 年基本趋于冲淤平衡, 可避免长期、持续大量淤积的局面. 同时, 在黄河小浪底水库回水末端挖粗沙不但可减少水库淤积, 而且还可拦截粗沙进入下游而降低黄河下游冲淤平衡坡降. 在小浪底水库大量拦沙、冲刷下游河道所营造的相对良好河型基础上, 可以期待长远只利用在现有水库拦截粗沙便可缓解或实现黄河下游河道不抬高.

关键词
水库泥沙
分选沉积
淤积控制

水库是人类储存淡水的主要方式, 而泥沙淤积正在大量损失库容. 地球每年侵蚀泥沙 500~700 亿 t, 只有 13%~20%输送到海洋[1], 平均 1%水库库容被泥沙淤积[2], 年损失库容 500 亿 m^3/a[3] 超过了三峡库容.

中国水库淤积问题十分突出. 20 世纪 80 年代前, 水库相对较小且多分布在黄河等多沙流域, 年淤损库容占总库容 2.3%[3, 4]. 作者根据国内 50 余座大中型水库资料概算, 三峡和小浪底等大型水库蓄水后, 大中水库年淤损库容约 1.16%, 与世界平均水平接近. 含小型水库后损失比例更大. 1999 和 2003 年小浪底和三峡蓄水后, 中国两条主要河流进入下游沙量分别降低到 1.1 亿 t/a(1999~2008)和 0.56 亿 t/a(2003~2009)(图 1). 以 1960 和 1990 年前黄河与长江平均沙量为背景值, 即使水保措施完全拦截泥沙在坡面、减少 3 亿 t[5]泥沙进入黄河, 两流域水库和河槽拦沙量超过 16 亿 t/a. 实际上, 水保措施还包含大量水库拦沙[6].

为减少淤积、增加水库寿命, 目前主要手段是流域水土保持、水库优化调度和机械清淤等, 已取得了一定成效[3, 7]. 黄河流域水土保持主要通过坡改梯、植树绿化和淤地坝. 实践证明淤地坝发挥了绝对减沙作用. 但淤地坝维持时间短、需依靠不断增加坝地持续拦沙, 否则效果会降低、甚至增加泥沙[8]. 长江流域 1989 年以来较大规模治理水土流失. 嘉陵江泥沙大量减少但金沙江 20 世纪 90 年代反而增加[9, 10].

英文版发表信息: Zhou J J, Zhang M, Cao H Q. Removing coarse sediment by sorting of reservoirs. Sci China Tech Sci, 2011, 54: 903–913, doi: 10.1007/s11431-011- 4326-z

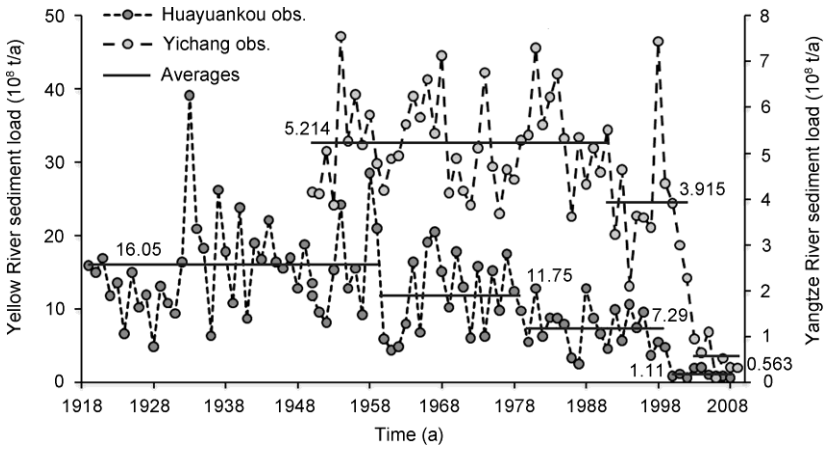

图 1　长江、黄河年沙量的变化情况

嘉陵江减沙主要在径流较小年份[10], 1991~2006 年嘉陵江平均年径流比之前长系列减少 21%[11], 流域水保措施占总减沙量 16.3%[12]. 水保措施还难以发挥大的作用.机械清淤主要是挖泥, 水利行业挖泥主要集中在河湖维护整治[13]、水库挖泥规模很小[14]. 优化水库调度是目前的主要减淤措施. 三峡工程为采用“蓄清排浑”调度配备了大量泄洪设施, 可宣泄千年一遇洪水流量、尽量降低汛限水位和最大限度利用汛期丰沛流量增加排沙[15~17]. 黄河小浪底工程初设也是按逐步抬高运行水位、“拦粗排细”, 用拦沙库容尽量拦截对黄河下游危害较大的粗沙以对下游更长发挥减淤作用. 然而注意到实际水库淤积比例一般大于预期. 三峡蓄水到 2010 年实测排沙比只有 24.7%, 2006 年以来长期稳定在 16.3%; 小浪底到 2009 年平均排沙比只有 17.2%. 据作者计算[18], 三峡水库 100 年不能达到冲淤平衡, 后期淤积对库容、防洪和库尾通航等影响会比较严重. 而且, 现行较为有效的调度减淤方式与工程开发目标之间矛盾较大, 特别是干旱和半干旱地区减淤与兴利、长期与短期利益之间矛盾更大. 多沙河流水库淤积寿命很短, 小浪底预期拦沙寿命仅 20 年. 流域河谷空间是非常有限和不可再生的资源[3], 必须高度重视和保护现有库容, 为后代留下可维持的水资源储备条件, 探索可持续的水库减淤途径是我们责任和任务.

本文主要研究了粗沙在大型河道型水库的分选淤积规律及其对淤积的影响、利用水库自然动力分选和清除粗沙、降低平衡淤积程度的方式. 在水库变动回水区适当位置以一定规模固定、连续挖粗沙可大量减少淤积、保护长期兴利和防洪库容. 这是实现水库长期利用的方向, 也是黄河下游减淤的一条途径.

1　粗沙分选沉积及对泥沙淤积的影响

河道型水库指具有一维线形形态, 回水范围较大、库区速度和水面坡降较大、具有一定输、排沙能力的水库. 三门峡、三峡、小浪底和目前在建的多数大型水库都是河道型水库. 河道型水库泥沙多以三角洲形式自上而下逐步向坝前堆积、趋向冲淤平衡(图 2). 河道水库回水范围包括常年回水区和变动回水区. 大型水库变动回水区达上百公里, 如三峡水库常年回水长度 480 km, 变动回水长 120 km 以上. 同时, 水库淤积会使回水将上延形成上延回水区. 河道型水库淤积挤占防洪、兴利库容, 上延还对更大范围造成影响, 对水库防洪能力和库区回水影响严重[19]. 在通航和人口密集地区, 回水上延对库区淹没和库尾航道影响更大. 河道水库后期淤积状态决定了水库调节能力, 而前者决定于淤积三角洲平衡坡降, 它在很大程度上决定工程的长期利用程度和可持续性.

水库淤积是一个长期的堆积过程, 淤积快慢决定于水沙条件和水库运行方式. 在运行方式确定后, 河道水库最终都会建立类似冲积河流的平衡状态. 根据河流动力学, 冲积河道形态是由径流和泥沙条件决定的[20]. 在侵蚀基面确定条件下, 淤积三角洲顶坡或冲淤平衡坡降 J 是表征淤积形态最重要参数. 设

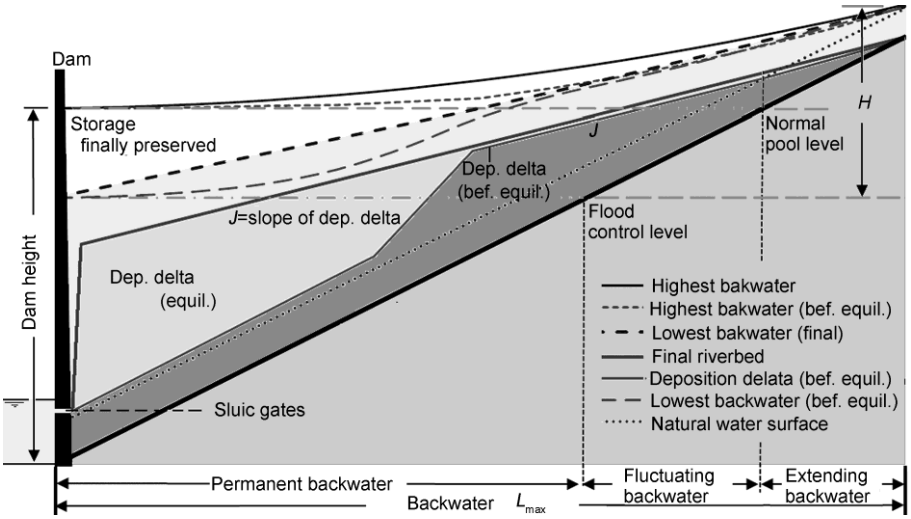

图 2　河道型水库淤积三角洲示意图

Q 是入库特征流量或造床流量[20], S 是相应泥沙浓度、ω是入库平均泥沙沉速, n 是库区河道糙率系数, 根据水流连续方程、能量方程及挟沙能力公式[21]:

$$\Phi = k\left(\frac{U^3}{gH\omega}\right)^m. \tag{1}$$

水库冲淤平衡后, 假设 $S=\Phi$可得

$$J \propto \omega^{5/6} S^{5/6m} n^2 \left(B/Q\right)^{1/2}, \tag{2}$$

其中 U 是流速, H 水深, B 水面宽度, k, m 与河流相关的常数, g 重力加速度.若库区河道完全由泥沙淤积塑造, 平衡河宽和相应条件下库区糙率系数也都应由水沙条件决定. 根据 Leopold 等人[22]的冲积河道几何形态河相关系和钱宁等人[23]提出的糙率系数:

$$B \propto Q^{\beta}, \tag{3}$$

$$n \propto D_{65}^{1/6}, \tag{4}$$

其中$\beta \approx 0.5$, D_{65} 为河床表层淤积泥沙中 65%较之为细的粒径. 可得水库冲淤平衡坡降:

$$J = k_1 \omega^{5/6} S^{5/6m} D_{65}^{1/3} Q^{-1/4}. \tag{5}$$

可见入库泥沙越粗(ω大)平衡坡降越大、淤积床面代表粒径 D_{65} 也越大, 后者也增加平衡坡降. 入库泥沙粗细对水库淤积形态影响很大. 作者后面用黄河下游实测 3000 m^3/s 流量水面比降进行了检验, 并与三峡水库模型预报结果比较, 证明(5)式符合实际情况.

国际上一般将 0.062~2.0 mm 泥沙定义为砂, 我国江河都含有一定比例砂, 但数量不大. 本文根据研究需要和泥沙可利用情况定义 d>0.1 mm 为粗沙或“砂”. 图 3 是长江、黄河等流域大中水库和个别小水库入库泥沙级配. 一般上游或支流泥沙偏粗, 干流较细. 长江干流水库入库砂大约占 10%~15%; 黄河比例偏少, 三门峡、小浪底砂只占 4%~5.2%. 长系列平均, 长江黄河进入干流水库三峡、小浪底或三门峡总砂量都约在 6000~7000 万 t/a. 干流和支流水库砂的比例一般不超过 20%. 表 1 是我国一些代表性水库入库泥沙特征. 根据水文观测规范计算分组沉速:

$$\omega = \sum \omega_i \Delta P_i, \tag{6}$$

表明砂量对平均沉速影响很大. 平均看全部或 50%扣除砂后, 入库泥沙平均沉速分别减小 2/3 和 1/3. 由(5)式, 即使忽略床沙特征粒径 D_{65} 影响, 冲淤平衡坡降可减 62%和 27%, 三峡和小浪底减砂 50%可减平衡坡降 28%和 18%.

理论上, 扣除岸边约束和一定水沙条件差异后, 河道型水库在相同水沙条件下的平衡坡降应大致趋于其下游最近的冲积河道坡降. 三峡和小浪底下游的荆江和河南河段都是完全冲积河道, 坝下与库区水沙条件差异较小, 水库平衡坡降应大致接近其下游. 上世纪 60 代末上荆江平均坡降 $0.53^0/_{000}$[24], 黄河西霞院至东坝头平均坡降 $2.32^0/_{000}$[6]. 三门峡水库目前已基本冲淤平衡, 无壅水条件下潼关以下库区平均坡降是 $2^0/_{000}$[25]或 $2^0/_{000}$~$2.3^0/_{000}$[6], 与下游河段坡降很接近. 按前述分析, 若三峡、小浪底平衡坡降分别按 $0.53^0/_{000}$ 和 $2.0^0/_{000}$, 回水 500 和 100 km 估计, 减砂

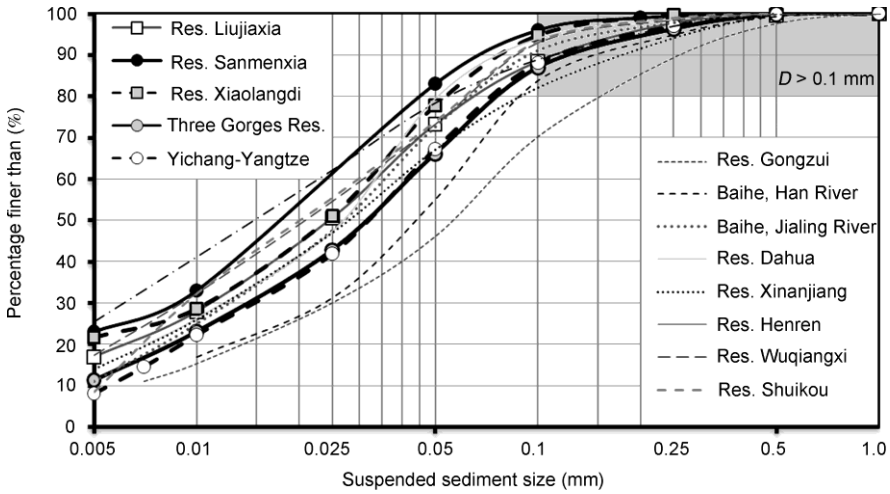

图 3　国内部分河流的水库入库泥沙级配

表 1　中国部分代表性水库入库泥沙及预计淤积三角洲坡降特性

Location			D_{50} (mm)	>0.1 mm sediment ratio (%)	Fall velocity (cm/s)	Remove all CS		Remove 50% CS	
Basin	River	Reservoir, section				Mean fall velocity (cm/s)	J/J_0	Mean fall velocity (cm/s)	J/J_0
Yangtze	mainstream	TGP	0.032	13.1	0.470	0.138	0.36	0.316	0.72
	mainstream	GZB	0.031	11.9	0.418	0.139	0.40	0.288	0.73
	Jinsha$^{\tau}$	Pinshan	0.047	23.0	0.813	0.183	0.29	0.539	0.71
	Jialing$^{\tau}$	Beibei	0.027	8.9	0.343	0.124	0.43	0.238	0.74
	Bailong$^{\tau}$	Baozhusi	0.039	13.8	0.430	0.169	0.46	0.310	0.76
	Dadu$^{\tau}$	Gongzui	0.055	29.8	1.123	0.178	0.22	0.733	0.70
	Han$^{\tau}$	Danjiangkou	0.045	16.3	0.634	0.184	0.36	0.429	0.72
	Han$^{\tau}$	Ankang	0.024	11.0	0.543	0.112	0.27	0.340	0.68
	Yuan$^{\tau}$	Wuqiangxi	0.022	7.1	0.286	0.120	0.48	0.206	0.76
	Fuchun river	Xinanjiang	0.029	18	0.584	0.112	0.25	0.371	0.69
YR	mainstream	SMX	0.022	4.0	0.163	0.082	0.56	0.124	0.79
	mainstream	XLD	0.024	5.2	0.203	0.114	0.62	0.160	0.82
	upstream	Longyangxia	0.042	20.0	0.689	0.162	0.30	0.455	0.71
	upstream	Liujiaxia	0.025	11.6	0.385	0.109	0.35	0.255	0.71
Pearl River	Hongshui$^{\tau}$	Dahua	0.027	6.1	0.248	0.111	0.51	0.181	0.77
	Yu$^{\tau}$	Xijin	0.021	9.3	0.258	0.081	0.38	0.174	0.72
Songliao River	Songhua River(2)	Fengman	0.043	21.5	0.646	0.157	0.31	0.431	0.71
	Hun$^{\tau}$	Huanren	0.016	11.1	0.349	0.078	0.29	0.221	0.68
	Hun$^{\tau}$	Dahuofang	0.028	15.2	1.015	0.111	0.16	0.601	0.65
Haihe	Yongding$^{\tau}$	Guanting	0.031	9.0	0.329	0.150	0.52	0.244	0.78
Minjiang	Min River	Shuikou	0.022	6.8	0.257	0.118	0.52	0.190	0.78

50%分别可降低永久回水末端平衡淤积面 7.4 和 3.6 m. 这一比降变化的效果非常可观.

另一方面, 砂在河道型水库中淤积具有显著特点. 一般而言, 大型河道型水库在淤积三角洲到大坝前粗沙几乎完全、永久淤积在水库; 三角洲到坝前后排沙比明显提高, 但排砂能力还会在相当长时期内维持在低水平. 河道型水库中由于水流自上而下扩散, 库区流速和输沙能力沿程不断降低, 砂在库尾呈明显分选淤积、在小型径流式水库更是强烈分选沉积. 图 4 是三峡等超大型水库运行初期实测淤积物中径分布情况. 2004~2005 年三峡水库水位 135~139 m, 变动回水区(距坝 430~500 km)实测淤积物中径[26]汛前

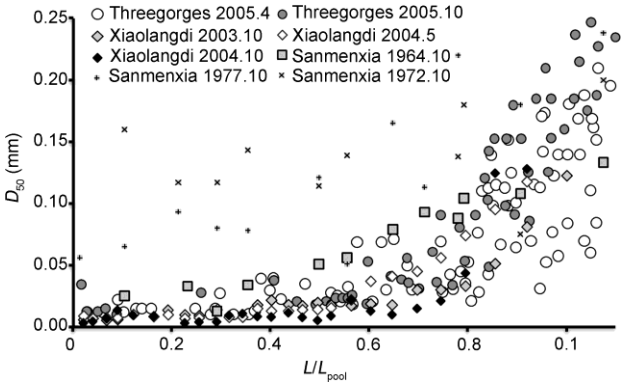

图 4　三峡等超大型河道水库淤积泥沙中值粒径实测资料

L 为距大坝和 L_{pool} 的回水长度(三峡,三门峡,小浪底分别 450,145,115 km)

0.13 mm、汛末 0.20 mm. 三门峡水库初期(1964 年前)粗沙集中在潼关以上、中径 0.11 m, 后因降低水位使粗沙向坝前推进, 1972 年后库区主槽河床表层泥沙中径都超过 0.1 mm. 其它水库(图 5)在库尾淤积泥沙中径一般都超过入库泥沙的 d_{90} 或 0.1 mm. 初期水库主要淤砂在回水末端或上段、库尾分选沉积规律明显.

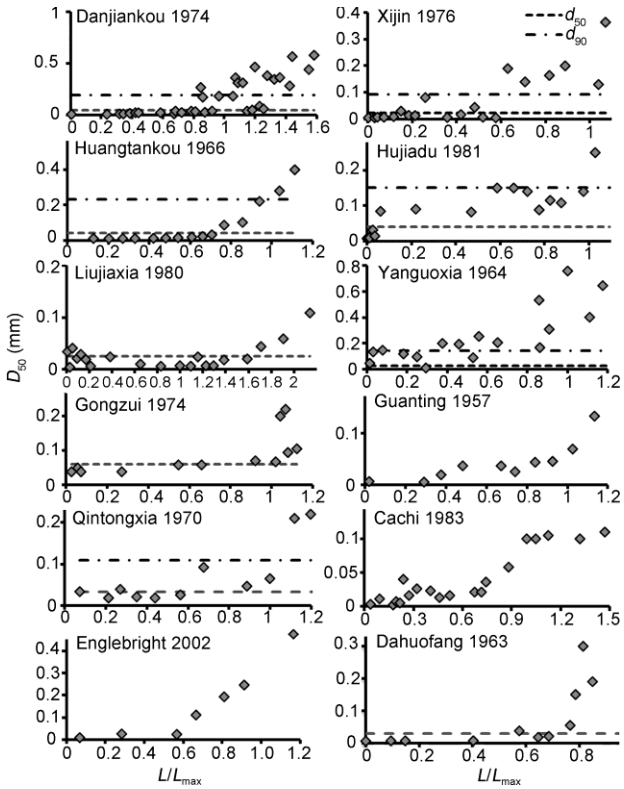

图 5　一些大型水库淤积泥沙中值粒径实测资料

L 为距大坝和 L_{max} 的回水长度

径流水库类似于大型河道型水库库尾, 水位变幅小、分选更明显. 葛洲坝 1981 年蓄水壅高 27 m, 回水 200 km 到奉节, 库容 16 亿 m^3, 是一完全低水头径流式水库. 初期库区流速较大、仅粗沙能在水库淤积. 1981~1982 年淤积(1.054 亿 m^3)约占同期入库沙量(12.74 亿 t)10%. 实测(图 6)显示全库上下床沙中径差别不大(D_{50}=0.167 mm), 大于入库泥沙 d_{90}(0.113 mm). 粗沙在葛洲坝水库完全呈分选沉积特征.

一般水库在初期粗沙淤积比例很大. 根据龙毓骞[27]修正后的三门峡出、入库泥沙资料, 1961~1964 年蓄水运用期间砂拦截比例 96.7%, 1965~1988 年尽管降低水位、冲淤基本平衡, 砂淤比例仍达 45%. 小浪底初期 6 年排出粒径大于 0.05 mm 粗沙只有 3.8%. 三峡最初 4 年排出粒径 0.125 mm 以上粗沙比例 0.1%. 可见, 大型河道水库回水末端和径流式水库对粗沙具有明显分选沉积作用, 水库可以分选粗沙, 特定河段具有“粗沙分选器”功能.

变动回水区分选沉积特性可从理论上加以证明. 对分组应用均匀沙不平衡输沙方程:

$$Q\frac{\partial S}{\partial x}=-\alpha\omega B(S-\Phi), \tag{7}$$

其中 Q 是流量, S 是泥沙浓度, Φ是挟沙能力，由公式(1)计算, x 是距离. 简单计, 设河宽 B 和恢复饱和系数 α为常数(即 $\varepsilon=\alpha/q$=常数, $q=Q/B$), 方程(7)可解得

$$S=S_0\mathrm{e}^{-\varepsilon\omega x}+\varepsilon\omega\mathrm{e}^{-\varepsilon\omega x}\int_0^x\Phi\mathrm{e}^{\varepsilon\omega t}\mathrm{d}t. \tag{8}$$

设水深如图 7 线性变化 $H=H_0(1+Jx/H_0)$, 挟沙能力公式(1)表示为

$$\Phi=\frac{\Phi_0}{(1+Jx/H_0)^{4m}}, \tag{9}$$

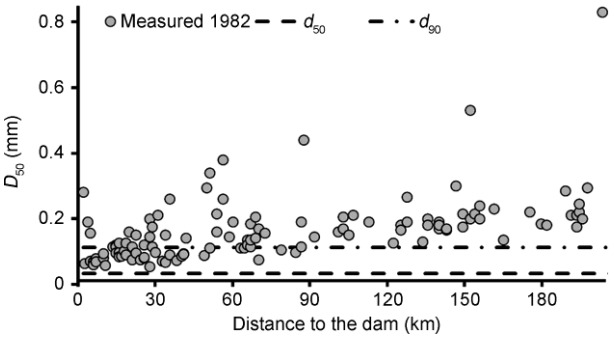

图 6　葛洲坝水库 1982 年实测淤积泥沙中值粒径

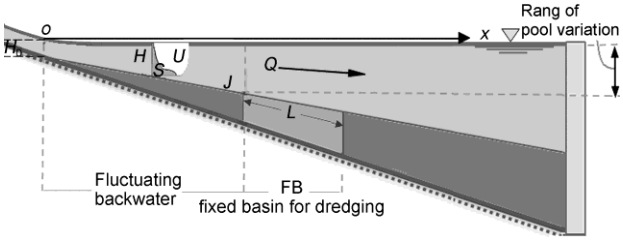

图 7　水库和泥沙分选淤积分析示意图

其中 J 是库区河床坡降, 可得分组泥沙在库区沉积比例 $\rho=(S_0-S)/S_0$ 为

$$\rho=1-\mathrm{e}^{-\varepsilon\omega x}-\frac{\Phi_0}{S_0}\varepsilon\omega H_0\mathrm{e}^{-\varepsilon\omega x}\int_0^{\frac{x}{H_0}}\frac{\mathrm{e}^{\varepsilon\omega H_0 t}\mathrm{d}t}{(1+Jt)^{4m}}. \quad (10)$$

假设进入回水后挟沙能力很快趋于来沙浓度 $\Phi_0=S_0$, H_0=10 m, J=4$^0/_{000}$, q=30 m^2/s ($\varepsilon H_0\approx$0.333 s/m), 可得不同粒径悬沙在水库回水末端的沉积比例(图 8). 粒径 0.1 mm 沙在 2000H_0 范围内沉积 85%以上. 设 L_{85} 是入库泥沙沉积 85%需要的相对距离, 图 9 给出由公式(10)确定的 0.1 mm 粗沙的 L_{85} 与水库河谷坡降和入库水力参数的关系. 三峡、三门峡和小浪底最大流量时参数分别大约是 εH_0 = 0.4, 1.0 和 0.4, 河谷比降大致是 2.5$^0/_{000}$, 3.5$^0/_{000}$ 和 8$^0/_{000}$, 据此可得 L_{85}=3000, 2000 和 1500, 绝对距离 60, 20 和 15 km. 实际上, 因水库平面上还扩大、L_{85} 更短. 初期水库粗沙分选沉积都在变动回水范围内, 随淤积增加和坡降减小, L_{85} 快速增加、粗沙逐步向近坝段堆积.

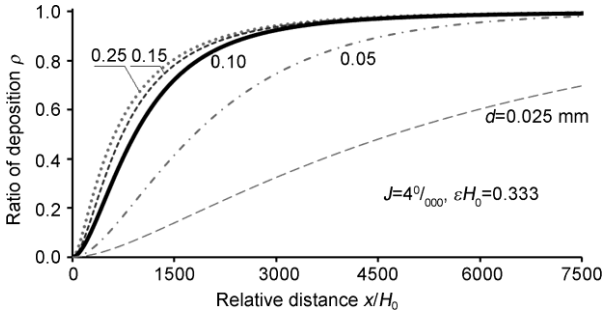

图 8　不同粒径泥沙在图 7 所示等宽水库中的淤积分布

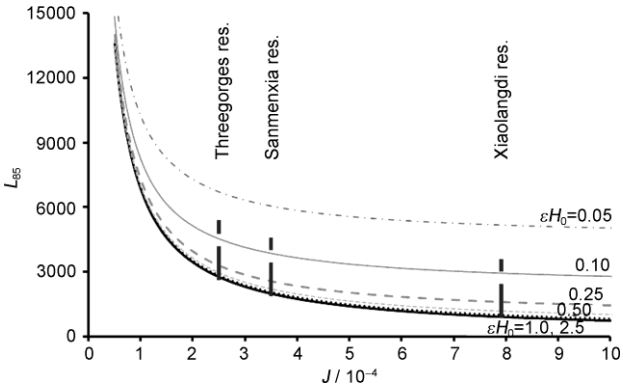

图 9　d=0.1 mm 泥沙在回水末端沉积距离 L_{85}

由图 9 还显示, 在汛期流量较小或汛后高水期间 L_{85} 明显缩短. 这进一步揭示粗沙会首先淤积在回水上段, 在大流量或库水位降落条件下再下移沉积.

2　水库减淤新方式-挖砂减淤及实例研究

根据前面分析证明粗泥沙对水库淤积三角洲和平衡淤积状态影响很大、泥沙在河道型水库中具有明显分选淤积规律、大于 0.1 mm 砂在初期河谷条件下会自然聚集在库尾特定河段. 这一特性对保护水库和减少淤积具有重要意义.

根据粗沙分选沉积规律, 在变动回水区特定库段持续挖除数量相对较少的粗沙是可能的. 在水库回水末端或变动回水区适当位置设固定挖砂河段 FB (Fixed Basin dredging for coarse sediment)或在大型河道水库上游设低水头、径流式前滞水库分选和拦截粗沙. 两种方式工程形式不同, 但原理一样, 因此后文都以 FB 表示固定挖砂减淤方式. 如图 7, 通过挖泥完全可以维持一个相对较短、水深较大的挖砂池 FB. 不断挖出其中泥沙, 砂可作建筑材料或抛掷到下游用以避免河道冲刷, 细泥浆就地或分散抛掷在库区增加水体浑浊度具有重要生态价值. 长期维持的 FB 一方面进一步强化粗沙分选沉积, 同时也可收集先前淤积在上游、趁低水位或大洪水冲刷下移粗沙, 成为一个“聚砂盆”. 根据初步研究[18], 大型河道水库 FB 可设在最低水位所对应的回水末端附近; 径流水库 FB 尽量靠近大坝, 便通过管道将砂送到坝下. FB 位置可通过实测资料分析、数学模型优化计算和试验确定.

根据前面分析, FB 挖砂在理论上可大幅度降低水库平衡坡降、减少淤积. 但是, 减淤方式的可行性还需回答挖砂规模、FB 拦截粗沙效率、经济和社会效益等方面问题. 关于规模, 根据图 3 和表 1 资料, 长江、黄河干流多年平均砂量分别约 6000~7000 万 t 左右. 根据目前国内机械挖泥能力[14]、成本、价格和

沿江对河砂需求情况[18], 即使将砂全部清除也无大的困难, FB 的高效拦砂能力已经得到证明. 进一步值得强调, 河道型水库挖砂比一般疏浚工程更具下述优势. 1) 河段固定: 挖泥船配置要求低, 施工方便简单, 可采用电动力来降低作业成本、减少污染; 2) 运输方便: 一般大型水库库区都可通航, 便利水运将砂运出; 3) 环境友好: 抛掷细泥浆系当地淤积泥沙, 不影响水质和周边环境, 不需堆置占地; 细泥浆返回水库还能提高水体混浊度、抑制藻类生长、保护库区水质; 4) 分选高效: 0.1 mm 以上粗沙还可进一步在疏浚系统内进行机械分选或在泥舶内进行水力分选. 国家土地保护和生态环境要求提高、严格限制农田采砂, 大型河道水库是重要砂源. 根据作者初步测算水库挖砂在经济上基本可行[18].

作为实例, 周建军等人[18]利用泥沙数学模型研究了三峡水库挖砂减淤问题. 数学模型建立在不恒定水流泥沙运动基础上[28], 已根据多种资料和三峡 2003 年蓄水以来实测资料进行了检验[29]. 模型完整模拟了整个水库, 按设计水沙系列(60 系列: 1961~1970 年)和三峡蓄水前十年少沙系列(90 系列: 1993~2002 年)分别计算了淤积 200 年情况. 计算将不均匀泥沙按界限粒径 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.075, 0.10, 0.15, 0.25, 0.50 mm 分八组. 除原方案(初设 175-155-145 方案)外, 研究 10 个 FB 方案分别布置在变动回水区铜锣峡出口至涪陵之间, 各 FB≈10 km, 砂的界限粒径 0.1 mm. 计算显示, 随 FB 位置自上而下, 挖砂量和减淤量逐步增加, 减淤和挖砂量之比都在 1.0 左右. 减淤效果最好的 FB 方案在长寿以下 10~20 km 之间. 最佳方案针对 60 系列, 100 年年均挖砂 3800 万 m^3、平均拦截粗沙 69%, 100 年末水库淤积从 177 亿 m^3 降低到 140 亿 m^3; 90 系列 100 年年均 2350 万 m^3、平均 58%粗沙被拦截, 水库淤积从 135 亿 m^3 降低到 110 亿 m^3. 水库淤积情况(图 10)显示, 仍然按 60 系 列, 原方案到 100 年水库和重庆河段淤积都没有达到真正平衡, 到 200 年水库和重庆河段淤积分别达到 225 和 2.7 亿 m^3. 采用挖砂减淤后 200 年水库和重庆淤积量分别可控制在 157.7 和 0.71 亿 m^3, 比原方案 100 年淤积数量还小很多. FB 挖砂对库尾和变动回水区减淤效果尤其明显. 如果今后水沙条件改善, 入库泥沙长期维持在 90 系列(沙量 3.46 亿 t/a)水平, 挖砂方案可将 200 年淤积控制在 123 亿 m^3 以内、重庆河段最大淤积不超过 0.27 亿 m^3, 而且基本冲淤平衡. 三峡工程可持续性可得到保证.

FB 拦截粗沙使淤积三角洲坡面泥沙明显细化, 因此冲淤平衡坡降显著降低. 图 11 是 60 系列, 原方案和最优挖砂方案在 200 年内库区河床表层淤积物中径 D_{50} 变化情况. 前 40 年淤积三角洲未到坝前期间, 库区淤积粒径很细. 之后原方案淤积粒径变粗并渐进向坝前发展, 到 200 年时近坝段粒径仍比上游明显偏细. 可见淤积三角洲几何峰面到达坝前相对较快, 粗沙峰面需要很长时间交换冲淤才能逐步向坝前发展. 水库冲淤平衡应该是上下淤积粒径接近后才真正建立. 从这个意义上, 三峡水库原方案到 200 年还未达到冲淤平衡. 同时受回水上延和淤积翘尾巴影响, 原方案淤积粒径也有向上细化趋势. 200 年时重庆河段淤积中径从初期 0.3~0.4 mm 降低到 0.2~0.3 mm, 这是淤积上延的表现. 相比之下, 挖砂使 D_{50} 分布发生了本质变化, FB 以下粒径明显变细, 40 年趋于上下一致、D_{50}<0.1 mm, 水库更快趋于较低淤积水平

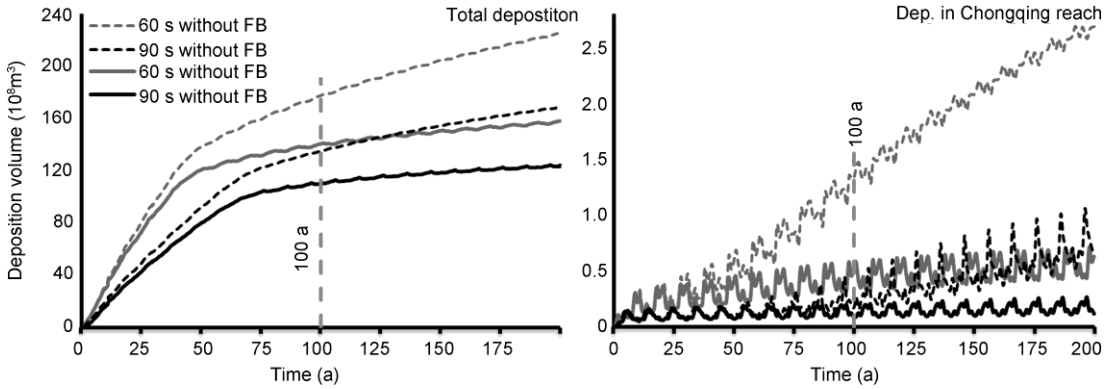

图 10　三峡水库及重庆河段原方案与挖砂减淤(FB)方案淤积结果比较(60 和 90 系列)

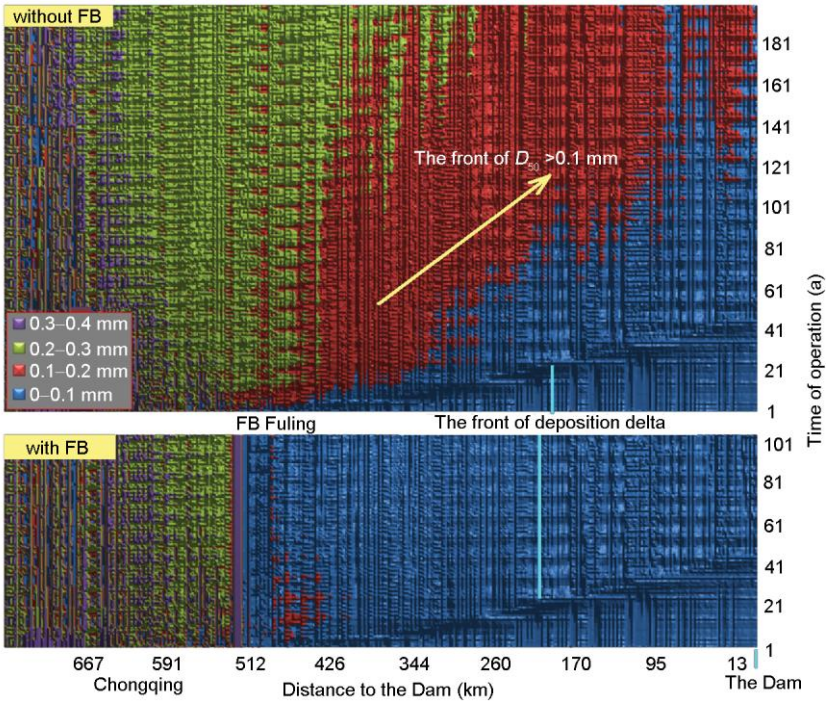

图 11　预报库区淤积物中径 D_{50} 的分布变化—原方案和 FB 挖砂方案比较(60 系列)

的平衡.

FB 拦截粗沙使水库淤积坡降明显降低. 在 60 水沙系列条件下, 原方案 100 年时库区平均坡降 $0.55^0/_{000}$, 200 年 $0.67^0/_{000}$, 都略大于 20 世纪 60 年代末期长江上荆江(自然状态)平均坡降 $0.53^0/_{000}$[24]. 上荆江坡降是天然情况下三峡出口泥沙堆积和冲淤平衡的产物, 但考虑到库区峡谷段岸边约束和边壁糙率影响, 三峡水库平衡坡降略大于荆江平均坡降是合理的. 图 12 是根据公式(5)计算三峡水库挖砂后减小

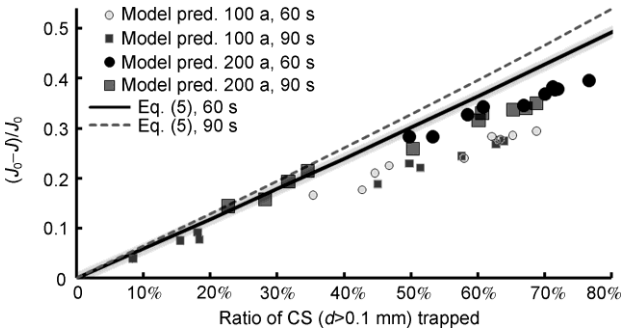

图 12　三峡水库粗沙减少比例对平衡坡降的影响—模型计算与理论公式(5)比较

J_0, J 为原方案和挖砂后涪陵以下平均坡降(流量 30000 m^3/s、坝前水位 145 m)

平均沉速和入库泥沙浓度得到的理论平衡坡降和数学模型计算 FB 挖砂后涪陵以下的平均水面坡降. 100 年时, 由于原方案淤积与平衡状态还有较大距离, 模型计算的坡降减少值低于理论值; 200 年时模型结果与理论线更接近, 二者在趋势上具有一致性. 拦截 d > 0.1 mm 粗沙 60%使三峡水库冲淤平衡坡降减小 35%、涪陵水位和淤积面高程降低 9.6 m, 库区和变动回水区洪水位和淤积面相应降低. 水库泥沙淤积的影响明显降低、回水上延范围也得到有效控制, 最终淤积程度得到大幅度缓解. 可长期保留更大兴利和防洪库容, 通航条件得到更好维护, 水库防洪对库区的影响不会随时间推移而增加.

3　一个重要推论—黄河下游淤积控制

黄河下游持续淤积抬高也是没有解决的问题. 目前主要依赖修建水库拦沙, 然而黄河流域拦沙坝(库)已很少, 依赖水库拦沙不能保证黄河长治久安. 而且大量水库刺激增加用水已使下游径流和汛期水量明显减少, 水库拦沙不但未改变下游持续抬高局面, 而且黄河下游面临淤积与缺水双重困境. 本文 FB 挖砂方式可推广到黄河拦截对下游危害严重的粗

沙. 可在小浪底回水末端挖砂或在下游另建一径流水库分选和拦截粗沙、缓解黄河下游持续淤积抬升局面.

Chien 等人[30]证明, 在黄河来沙中 d>0.05 mm 粗沙对下游淤积为害最大. 黄委[31]界定粗沙主要来中游黄埔、窟野、无定河等流域, 范围 7.86 万 km^2. 黄河流域水土保持重点主要集中在这一多沙粗沙区. 如此区域治理仍然十分艰巨, 徐建华等人[32]进一步将范围集中到面积 1.88 万 km^2 的 d>0.1 mm 粗沙区. 在复杂多变气候、环境和人类活动下, 大范围水土保持工程长期维护十分艰巨, 长期作用与效益尚难明确肯定, 然而粗沙对下游影响和作用已是治黄的共识.

粗沙对黄河下游淤积作用还可进一步根据实测资料[31]论证. 图 13 是三门峡建成至小浪底蓄水前 35 年实测平均沿黄粗沙通量. 每年下游粗沙淤积 3000 万 t、比例超过 85%. 许炯心等人[33]根据多年资料回归更认为粗沙淤积 97%. 按这些资料估计 35 年合计淤积粗沙 10.6 亿 t. 由花园口断面深层钻孔资料[34]计算主槽淤积物代表粒径 D_{50} 和 D_{30} 分布(图 14)表明, 近 40 余年表层淤积物(2 m 内)平均超过 40%粒径大于 0.1 mm; 天然情况下(2 m 以下认为不受三门峡等影响)远大于 50%和 70%淤积物粒径超过 0.1 和 0.08 mm. 虽然 35 年下游 d>0.1 mm 粗沙只占总淤积量 46 亿 t(断面法实测 32 亿 m^3)23%, 但粗沙淤塞主槽、能大幅度抬高水位、降低平滩流量、促进更大范围和更多淤积, 也是二级悬河形成的重要原因.

对黄河下游持续淤积抬高的原因, 学术界有"溯源淤积"[35, 36]和"沿程淤积"[37, 38]之争. 前者认为抬高是河口延伸[39, 40]的结果; 后者认为黄河沙多、比降太小, 是自上而下淤积. 这两种观点虽然截然相反, 但都肯定冲淤平衡比降对下游淤积抬高的作用. 图 15 是黄河在过去几个不同阶段 3000 m^3/s 流量水位沿程变化情况. 除三门峡蓄水期冲刷下游使上段比降略减小外, 不同时段黄河下游坡降基本相同: 上段(花园口)超过 $2^0/_{000}$、下段(河口利津)只有 $1^0/_{000}$. 这是下游纵剖面的重要特征, 它完全决定于下游各河段水沙条件. 图 15 同时给出根据实测断面泥沙资料、按公式(5)计算的沿程坡降, 计算与实测坡降之间很相似, 这也是对公式(5)正确性的一个检验. 公式(5)表明, 在流量、含沙量和平均沉速等因素中, 后者影响最大. 平均沉速很大程度由粗沙比例所决定, 所以减少进入下游粗沙可降低其平衡坡降、缓解持续抬高局面.

采用数学模型在简化条件下对小浪底库尾拦粗沙进行初步计算. 按小浪底入库泥沙资料, 假设进口处各级泥沙都冲淤平衡, 水库宽度不变, FB 深度比进口大 20%. 图 16 是各级泥沙的相对淤积强度和比例. FB 长度超过 400 UH 后, d>0.10 和 0.08 mm 粗沙超过 80%, 59%被拦截; FB 内平均, 大于 38%被挖泥沙粒径大于 0.1 mm, 小于 0.08 mm 细沙占 50%以下.

可见, 在小浪底水库采取 FB 挖砂方式长期拦截粗沙是可能的. 根据公式(5)只计平均沉速变化影响, 以小浪底入库泥沙级配资料作为进入下游平均级配, 表 1 显示拦截 d>0.1 mm 粗沙 50%可减小黄河下游平衡坡降 18%. 根据图 16 结果, 若拦截 d>0.1 mm 粗沙

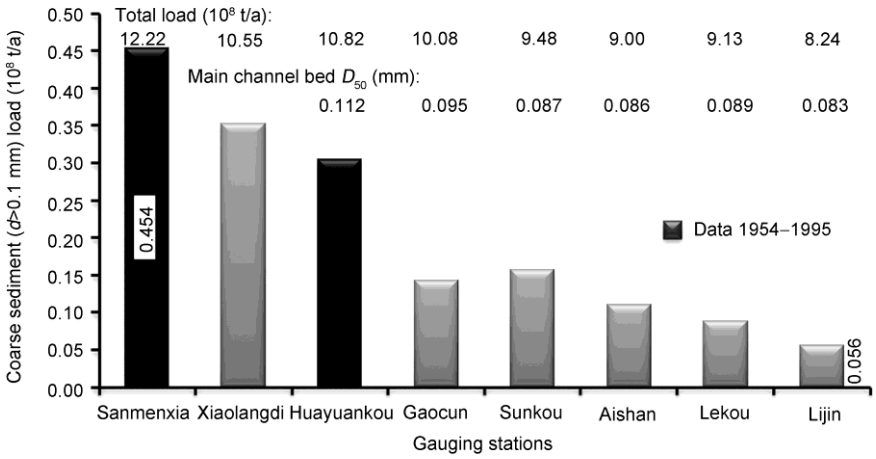

图 13　黄河下游粗沙量及总沙量沿程变化情况(1961~1995 实测)

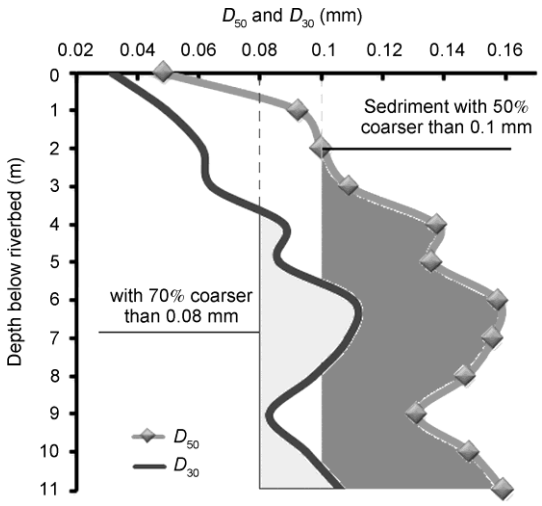

图 14　由钻孔资料[34]确定的花园口深层淤积物 D_{50} 和 D_{30}

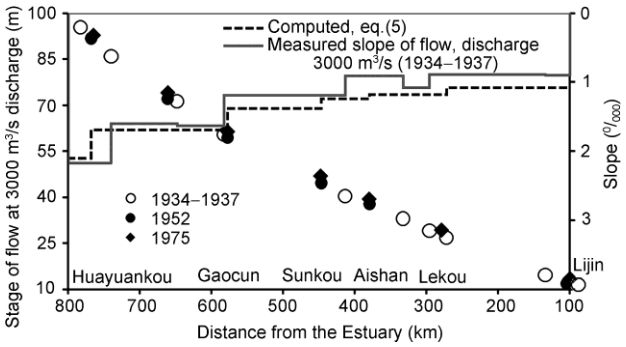

图 15　黄河下游实测 3000 m³/s 水位、坡降与公式(5)比较

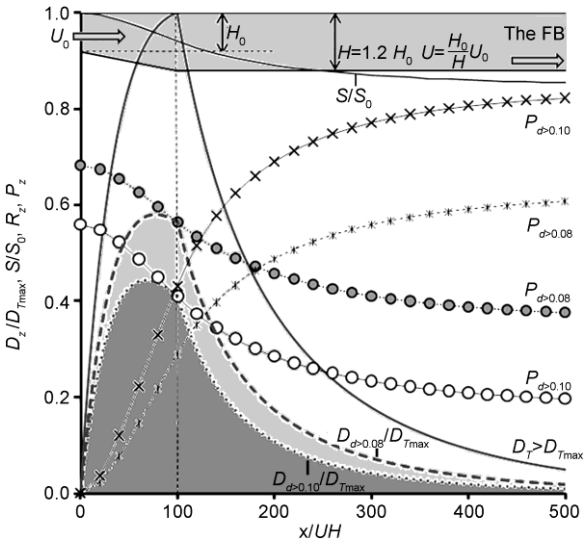

图 16　根据简化模型计算小浪底库尾 FB 挖砂的效率和作用

D_z, P_z 和 R_z 是由 z 给定的淤积厚度、沉降比例和在淤积物中的比例, $z=T$, d>0.08 和 d>0.10 示全沙、大于 0.08 和 0.10 mm 泥沙

60%、同时拦截 d=0.08~0.1 mm 较粗泥沙 25%, 由公式(5)平衡坡降可减小 25%. 这样程度的减小平衡坡降虽不能直接降低黄河下游河槽, 但对抑制河道持续抬高显然是有效的. 进一步考虑到小浪底水库拦沙至今已使黄河下游冲刷近 25 亿 m³, 主槽和平滩流量增大, 坡降减缓, 今后还会有所冲刷, 利用小浪底冲刷下游所营造的短暂有利局面, 进一步采取拦截粗沙措施就应该可以缓解小浪底水库拦沙能力减小后下游河槽的回淤和再次抬高.

相应于上述比例, 按 16 亿 t/a 沙量计算, 年挖砂规模约为 7300 万 t/a, 按三门峡平均入库沙量 12 亿 t/a 年挖砂规模 5500 万 t/a. 考虑到挖砂技术水平、粗沙商业价值[18]和小浪底库区良好 FB 挖砂条件和通航条件, 如此规模挖砂当是现实与合理的.

对黄河粗沙合理利用还需要开展更多研究. 初步设想可研究尽量分选出其中粗沙作为建筑材料; 利用小浪底下游温孟滩堆积粗沙、寻求长期利用; 通过管道输送到下游滩地用以消除二级悬河或更长远利用这些粗沙防止黄河口和海岸侵蚀. 如果拦截粗沙措施如期发挥良好效果, 黄河下游就不必长期依赖更多梯级水库拦沙. 而且, 拦截粗沙可使下游输沙能力提高, 水库下泄沙量还可适当增加. 这对保护下游及河口生态、环境等都更加有利. 同样, 拦截粗沙可使小浪底水库保留更多长期利用库容.

FB 拦截粗沙至少可为黄河治理提供一个全新思考空间.

4　结论

泥沙淤积是制约水库长期利用的关键问题之一, 长期以来没有得到根本解决. 本文研究了粗沙在水库中的分选沉积规律, 据此提出大型河道型水库挖粗沙控制淤积方式. 根据数学模型预报、理论公式计算水库平衡坡降与荆江、黄河下游实际坡降相当符合. 证明本文理论公式、模型结果符合实际情况, 结果具有一定可靠性. 根据大量实际资料分析、理论和模型计算发现: 1) 在河道型水库运行初期, d>0.1 mm 粗沙在进入回水或径流水库后会集中分选沉积; 2) 占入库沙量比例很少的粗沙对水库淤积三角洲形状或冲淤平衡坡降影响很大, 在可能范围内拦截一定比例粗沙可明显降低冲淤平衡坡降.

根据上述认识, 作者建议在大型河道型水库回

水末端适当位置采取定点、持续挖粗沙来减少淤积、保护库容, 实现水库长期和可持续利用. 同时, 挖取粗沙可提作为建筑材料和其他用途, 进一步研究扩大利用和降低成本的空间很大. 以三峡水库挖砂减淤为例, 多方案模型计算结果表明在变动回水区固定河段挖砂可拦截绝大部分粗沙进入深水区, 挖砂减淤比可达 100%, 水库可明显提前趋于较原方案淤积水平远低的冲淤平衡, 降低后期回水高度和防洪对库区的不利影响, 为库尾通航等多方面带来改善. 作为推论, 将本方法应用到黄河小浪底水库拦截粗沙, 还可以为控制有害粗沙进入黄河下游、降低河道平衡坡降. 为缓解黄河下游持续抬升创造一个值得研究的方向.

用科学手段切实保护现有水库功能和能力、实现长期利用, 以更少资源消耗长期维持水库对人类淡水、能源与安全的需求支撑, 保护江河、实现长治久安应该是“人水和谐”[41]水利科学发展观的具体体现.

参考文献

1 Walling D E, Webb B W. Erosion and sediment yield: a global overview. Proc. of the Exeter Symposium on Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives, IAHR, 1996. 236

2 Mahmood K. Reservoir Sedimentation: Impact, Extent and Mitigation. World Bank Technical Paper No. 71, Washington DC, 1987

3 Morris G L, Fan J. Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs and Watersheds for Sustainable Use. New York: McGraw-Hill, 1998

4 Palmieri A F, Shah A D. Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of Dams. J Environ Manag, 2001, 61: 149–163

5 中国国务院新闻办.《中国的减灾行动》白皮书. 2009

6 钱意颖, 叶青超, 周文浩. 黄河干流水沙变化与河床演变. 北京: 中国建材工业出版社, 1993

7 International Commission on Large Dams ICOLD. Question 74a Performance of Reservoirs, Sedimentation. 19th Congress on Large Dams. France: ICOLD, 1997

8 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区水土保持减沙的近期趋势及其成因. 泥沙研究, 2004, 2: 5–10

9 张信宝, 文安邦. 长江上游干流和支流河流泥沙近期变化及其原因. 水利学报, 2002, 4: 56–59

10 许炯心, 孙季. 长江上游重点产沙区产沙量对人类活动的响应. 地理科学, 2007, 27(2): 211–218

11 周建军, 曹广晶. 对长江上游水资源工程建设的研究与建议. 科技导报, 2009, 27(9): 48–56

12 许全喜, 陈松生, 熊明, 等. 嘉陵江流域水沙变化特征及其原因分析. 泥沙研究, 2008, 2: 1–8

13 胡春宏, 吉祖稳, 黄永健, 等. 我国江河湖库清淤疏浚实践与分析. 泥沙研究, 1998, 4: 47–55

14 曹慧群, 周建军. 我国水利清淤疏浚的发展与展望. 泥沙研究, 2011, 3: 1–5

15 Lin B, Dou G, Xie J, et al. On some key sedimentation problems of Three Gorges Project (TGP). Int J Sediment Res, 1989, 4(1): 57–74

16 长江科学院. 三峡工程 175 米方案水库泥沙数学模型计算成果分析. 三峡工程泥沙问题研究成果汇编(160–180 米蓄水位方案). 北京: 水力电力部科学技术司, 1988. 127–137

17 韩其为, 何明民, 徐俭立. 三峡水库 175 方案补充计算结果. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1993. 539–550

18 周建军, 曹慧群, 张曼. 三峡水库挖粗沙减淤研究. 科技导报, 2010, 28(9): 28–36

19 Zhou J J. Schemes of sediment management proposed for the Three Gorges Project (TGP). In: Proc. of the 9th International Symposium on River Sedimentation, 2004. 250–257

20 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987

21 张瑞瑾. 河流动力学. 北京: 中国工业出版社, 1961. 60–63

22 Leopold L B, Maddock T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. Professional Paper 252, US Geological Survey, Washington DC, 1953

23 钱宁, 麦乔威, 洪柔嘉, 等. 黄河下游的糙率. 泥沙研究, 1959, 4(1): 34–36

24 杨怀仁, 唐日长. 长江中游荆江变迁研究. 北京: 中国水利水电出版社, 1999

25 周建军, 林秉南. 从三门峡水库水沙条件变化看潼关高程. 水力发电学报, 2003(3): 50–58

26 张娜, 代文良, 朱辉. 三峡水库淤积物初期干容重试验初步分析. 人民长江, 2006, 37(12): 59–61

27 龙毓骞. 黄河流域水沙变化对三门峡水库及下游河道的影响. 郑州: 黄河水利出版社, 2002

28 Zhou J J, Lin B N. One-dimensional mathematical model for suspended sediment by lateral integration. J Hydraul Eng, ASCE, 1998, 124(7): 712–717

29 周建军. 水流泥沙数学模型. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. 173–278

30 Chien N, Wang K, Yan L, et al. The source of coarse sediment in the middle reaches of Yellow River and its effect on the siltation of the lower Yellow River. In: Proc. of the Int. Sym. on River Sedimentation, 1980. 1: 53–62
31 徐建华, 吕光圻, 张胜利, 等. 黄河中游多沙粗沙区区域界定及产沙输沙规律研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2000
32 徐建华, 吴成基, 林银平, 等. 黄河中游粗泥沙集中来源区界定研究. 水土保持学报, 2006, 20(1): 6–9
33 许炯心, 胡春宏, 陈建国. 不同粒径组泥沙对黄河下游沉积的影响及其在黄河治理中的意义. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(2): 310–317
34 徐建华, 高亚军, 陈鸿, 等. 1960 年前黄河下游河槽淤积物粒径组成分析. 泥沙研究, 2006(3): 1–5
35 张仁, 谢树楠. 黄河的淤积形态和黄河下游持续淤积的重要原因. 泥沙研究, 1985, 3: 1–10
36 王恺忱. 黄河河口与下游河道的关系及治理问题. 泥沙研究, 1982, 2: 1–10
37 左大康. 黄河流域环境演变与水沙运行规律文集. 北京: 地质出版社, 1991. 163–171
38 尹学良, 陈金荣, 刘峡. 黄河下游河床演变三大基本问题的研究. 水利学报, 1998, 11: 1–5
39 庞家珍, 司书亨. 黄河河口演变III—河口演变对黄河下游的影响. 海洋与湖沼, 1982, 13(3): 218–224
40 谢鉴衡. 论黄河下游纵剖面形态及其变化. 人民黄河, 1980, 1: 1–10
41 钱正英, 陈家琦, 冯杰. 人与河流和谐发展. 中国水利, 2006, 2: 7–10